

بررسی اثر ذرات سرامیکی ZrC روی خواص الکتروشیمیایی تیتانیوم تولیدشده به روش تفجوشی پلاسما جرقه‌ای

نیما حجازی^۱، منصور بزرگ^{۲*}، مریم شجاعی به‌آباد^۳

^۱ کارشناسی ارشد، ^۲ دانشیار، ^۳ استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی شیمی و مواد، دانشگاه صنعتی شاهرود

* نویسنده مسئول: m.bozorg@shahroodut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۳۱

چکیده

در بیومواد، در سال‌های اخیر تلاش شده است تا ایمپلنت‌ها با خوردگی و عوارض کمتر طراحی و ساخته شوند. در مطالعه حاضر، ویژگی‌های خوردگی کامپوزیت‌های تیتانیوم-کاربید زیرکونیوم ساخته‌شده با روش تفجوشی پلاسما جرقه‌ای با استفاده از آزمون امپدانس و پلاریزاسیون الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفت. محلول فیزیولوژیکی رینگر به عنوان محیط خوردگی استفاده شد. تیتانیوم خالص نیز برای مقایسه ساخته و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. آزمون امپدانس الکتروشیمیایی بیانگر این بود که نمونه با ۵ درصد کاربید زیرکونیوم مقاومت به خوردگی بالایی دارد. نتایج آزمون‌های پلاریزاسیون نشان داد که تیتانیوم خالص و تیتانیوم با ۵ درصد کاربید زیرکونیوم رفتار کاملاً پسیو داشته و پتانسیل شکست بالایی دارند.

کلیدواژه: کاربید زیرکونیوم، کامپوزیت تیتانیوم، تفجوشی پلاسما جرقه‌ای، خواص الکتروشیمیایی

An Investigation on the Effect of ZrC Ceramic Particles on the Electrochemical Properties of Titanium Produced by Spark Plasma Sintering

N. Hejazi¹, M. Bozorg^{1,*}, M. Shojaie Bahaabad¹

¹ MS.c, ²Associate Professor, ³Assistant Professor, Faculty of Chemical and Material Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

* Corresponding Author: m.bozorg@shahroodut.ac.ir

Submission: 2023, 03, 21 Acceptance: 2023, 07, 22

Abstract

In biomaterials, efforts have been made to design and manufacture implant materials with reduced corrosion and complications. This study examined the corrosion characteristics of Titanium-ZrC composites produced by spark plasma sintering using electrochemical impedance spectroscopy and polarization. The corrosion medium used was physiological Ringer's solution. Pure titanium was also fabricated and analyzed for comparison. The EIS measurements showed that the composite with 10% ZrC content had superior corrosion resistance. The polarization corrosion tests revealed that pure Ti and Ti-10% ZrC exhibited fully passive behavior and experienced breakdown at high voltage in the test potential region.

Keywords: ZrC, Titanium Composite, Spark Plasma Sintering, Electrochemical Properties.

۱- مقدمه

با توجه به نیاز روزافزون به ویژگی‌های هم‌زمان فلزات و سرامیک‌ها، کامپوزیت‌های زمینه فلزی^۱ که شامل تقویت‌کننده‌های سرامیکی حاضر در یک زمینه فلزی هستند و ترکیبی از خواص فلزی و خواص سرامیکی را دربر گرفته‌اند، مطرح شدند. به دلیل خواص بهبودیافته، کامپوزیت‌های زمینه فلزی به‌طور گسترده‌ای در مصارف کاربردی با کارایی بالا استفاده می‌شوند [4]-[1]. ویژگی‌های کامپوزیت‌های زمینه فلزی مثل بهبود خواص کششی، فشاری و خزشی، مقاومت برشی و تریبولوژیکی و همچنین بهبود چگالی متوسط، انبساط حرارتی و انتشار حرارتی، عمدتاً به‌واسطه افزودن تقویت‌کننده سرامیکی اتفاق افتاده است [5].

تلاش‌های اولیه برای ورود تیتانیوم به‌عنوان بستر فلزی کامپوزیت‌ها حدود سال ۱۹۷۰ بود که با افزودن الیاف‌های تقویت‌کننده سرامیکی، اولین کامپوزیت‌های زمینه تیتانیومی تقویت‌شده با الیاف بروسیک^۲ تولید شد [6]. تیتانیوم و آلیاژها یا کامپوزیت‌های پایه تیتانیومی دارای چندین ویژگی عالی و جذاب، مانند نسبت استحکام به وزن بالا، چگالی کم، مقاومت در برابر خوردگی خوب، توازن خوب خواص مکانیکی و مقاومت حرارتی بالا، هستند. در میان فازهای تقویتی، کاربیدهای فلزات واسطه، ازجمله کاربید زیرکونیوم به‌عنوان یک سرامیک نسوز با نقطه ذوب بالا (بیش از ۳۵۰۰ درجه سانتی‌گراد)، چگالی کم، سختی بالا (بالای ۲۴ گیگاپاسکال)، پایداری حرارتی عالی و مقاومت در برابر خوردگی خوب، جذابیت‌های ویژه‌ای را به‌منظور عامل تقویت‌کننده تیتانیوم ایجاد می‌کند. کاربید زیرکونیوم در کاربردهای ساختاری با دمای بسیار بالا، مانند ابزارهای برش، قطعات موتور جت، کلاهک دماغه و لبه‌های جلویی هواپیماهای فضایی، استفاده می‌شود. با این حال، پخت پذیری

کم و چقرمگی شکست ضعیف، کاربرد عملی آن را محدود می‌کند [7]. روش‌ها متعددی به‌منظور ساخت قطعات کامپوزیتی پایه تیتانیومی توسط محققان ارزیابی شد که در مقایسه با سایر روش‌ها، روش متالورژی پودر برای ساخت قطعات با تراکم بالا بیشتر موردتوجه قرار گرفت. تفجوشی پلاسما جرقه‌ای^۳ (SPS) به‌عنوان مناسب‌ترین روش متالورژی پودر شناخته شده است که در طی آن به‌منظور دستیابی به ساختار ریزدانه، محصول در دماهای پایین‌تر و در زمان پخت کوتاه تولید می‌شود [8]. رفتار رشد دانه و خواص مکانیکی تنگستن تقویت‌شده با کاربید زیرکونیوم و زیرکونیوم توسط ژی^۴ و همکارانش در سال ۲۰۱۵ مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که با افزودن مقدار کمی زیرکونیوم و کاربید زیرکونیوم از رشد دانه تنگستن در درجه حرارت بالا جلوگیری شده است. اثر ترکیب ذرات سرامیکی کاربید زیرکونیوم با کاربید تیتانیوم با درصد‌های مختلف مول از هردو سرامیک توسط لی^۵ و همکارانش در سال ۲۰۱۵ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد در درصد‌های کمتر کاربید زیرکونیوم، با افزایش دمای پخت از ۱۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به بالاتر، تراکم نسبی نمونه از ۹۵ تا ۹۸/۹ درصد افزایش داشته است. همچنین با افزایش دمای پخت، سختی و یک‌رزش افزایش یافته و بیشترین مقدار برای کامپوزیت‌های حاوی ۱۰ و ۲۰ درصد مول کاربید زیرکونیوم، در بازه دمایی ۱۷۰۰ تا ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد در حدود ۲۶ گیگا پاسکال محاسبه شده است [7]. رفتار خوردگی کامپوزیت‌های تیتانیوم-آلومینا ساخته‌شده به روش تفجوشی پلاسما جرقه‌ای توسط بهرامی نسب^۶ و همکارانش در سال ۲۰۱۹ بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش چگالی جریان در هر سه نمونه اتفاق افتاده است، اما این افزایش در نمونه‌های تیتانیوم خالص و ۲۵ درصد حجمی آلومینا مشهودتر بوده است [9]. در پژوهشی دیگر

¹ Metal-Matrix Composites

² Borosic Fiber

³ Spark Plasma Sintering

⁴ Z.M. Xie

⁵ Ying Li

⁶ Bahraminasab

طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی^۱ کامپوزیت‌های تیتانیوم-آلومینا تولیدشده به روش تفجوشی پلاسما جرقه‌ای توسط بهرامی نسب و همکارانش در سال ۲۰۱۹ مورد بررسی قرار گرفت. با افزودن آلومینا، یک رفتار خازنی مشاهده شد که نشان‌دهنده ایجاد یک لایه فیلم پسیو روی سطح نمونه با ۲۵ درصد حجمی آلومینا بود که در نمونه ۵۰ درصد حجمی به دلیل تشکیل اکسید تیتانیوم، رفتار متفاوت بود [10]. آبه^۲ و همکارانش در سال ۲۰۲۰ اثرات افزودن نیتريد‌های مختلف از جمله، نیتريد آلومینیوم (AlN)^۳، نیتريد تیتانیوم (TiN) و نیتريد بور هگزاگونال (h-BN) را بر ریزساختار، خواص مکانیکی، شیمیایی و اکسیداسیون کامپوزیت‌های پایه آلیاژ تیتانیومی (Ti6Al4V) مورد مطالعه قرار دادند [11].

در مقاله حاضر پس از تهیه نمونه‌های زمینه تیتانیومی با درصد‌های مختلف از کاربید زیرکونیوم به روش تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای، دانسیته نمونه‌ها با کمک ارشمیدس محاسبه شده و در ادامه از آزمون‌های امپدانس و پلاریزاسیون الکتروشیمیایی جهت بررسی رفتار الکتروشیمیایی این کامپوزیت‌ها استفاده شد.

۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش برای ترکیب پودرها از روش مخلوط سازی مرطوب یا مخلوط سازی مبتنی بر حلال استفاده شد. در این روش به منظور مخلوط سازی پودرهای تیتانیوم و کاربید زیرکونیوم، پس از وزن کردن مقدار مورد نیاز از آن‌ها، درون بشر ریخته شد و به مقدار کافی متانول، به طوری که مقداری بالاتر از سطح پودر باشد و تمامی پودر را در برگیرد، به آن افزوده شد. مخلوط ایجادشده به مدت ۳ الی ۴ ساعت بر روی همزن مغناطیسی تحت حرارت ۶۰ درجه سانتی گراد قرار داده شد. سرعت همزن نیز به منظور هدر نرفتن مواد اولیه و عدم پاشش آن به خارج از بشر بر روی ۷۰ دور در دقیقه تنظیم شد. پس از حذف حلال و تبخیر تقریبی آن، مخلوط گل

مانندی از مواد اولیه درون بشر تشکیل شد که قابلیت چرخش مگنت در آن وجود نداشت. در این حالت، بشر درون آون قرار گرفت و در مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد، حلال باقی مانده در بین مخلوط پودرها نیز تبخیر شد. مخلوط پودر خشک شده در هاون کمی ساییده و ذرات درشت تر خرد شد. پودر آماده شده جهت جلوگیری از جذب رطوبت در ظرف درب بسته ای ریخته شد و به منظور انجام عملیات ساخت و تفجوشی ارسال گردید.

برای انجام عملیات تفجوشی پلاسما جرقه ای به مرکز صنعتی سازی نانو فناوری آیکن ارسال شد. برای تولید قالب‌هایی از جنس گرافیت با قطر ۲/۵ سانتی متر و ارتفاع ۰/۸ سانتی متر ساخته شد. نمونه‌ها در دمای ۱۳۰۰ درجه سانتی گراد و فشار ۴۰ MPa و به مدت ۵ دقیقه در این قالب‌های گرافیتی ساخته شد. سپس نمونه‌ها از دستگاه خارج شده و پس از سرد شدن کامل، نمونه‌ها در طی چند مرحله سنباده‌زنی شد و سطوح آن‌ها صاف و صیقلی و عاری از گرافیت شد. مرحله سنباده‌زنی جهت زدودن گرافیت از سنباده‌های سخت‌تر با مش ۱۰۰ تا سنباده‌های نرم‌تر با مش ۲۵۰۰ انجام شد.

با هدف سنجش دانسیته نمونه‌های ساخته شده و مقایسه دانسیته اندازه‌گیری شده با دانسیته تئوری، پس از ساخت نمونه‌ها و از بین بردن گرافیت از روی سطوح نمونه‌ها که پس از خروج از قالب گرافیتی سطح نمونه‌ها را پوشانده بود، چگالی نمونه‌ها به روش ارشمیدس سنجیده شد. با استفاده از داده‌های به دست آمده از آزمون سنجش دانسیته، مقدار دانسیته ظاهری و دانسیته نسبی برای هر نمونه به طور جداگانه گزارش شد. دانسیته نسبی با تقسیم دانسیته ظاهری به دانسیته نظری کامپوزیت‌ها محاسبه شد. فرمول محاسبه دانسیته ظاهری نمونه‌ها به شرح زیر است:

$$D_a = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho \quad \text{رابطه (۱)}$$

¹ Electrochemical impedance spectroscopy

² John Olorunfemi Abe

³ Aluminium nitride

و کاربرد زیرکونیوم در هر نمونه متفاوت است، دانسیته تئوری هر یک از نمونه‌ها نیز متفاوت است. با مقایسه میزان دانسیته تئوری و ظاهری هر نمونه، مشاهده شد که اختلاف دانسیته کم بوده و نمونه‌ها از دانسیته نسبتاً خوبی برخوردارند. دانسیته نسبی هر یک از نمونه‌ها محاسبه و در جدول ۱ گزارش شده است.

نمونه تیتانیومی خالص پس از تفجوشی پلاسما جرقه‌ای، دانسیته بسیار بالایی در حدود $4/49 \text{ g/cm}^3$ داشته است. شاهدهی اصل و همکارانش با تفجوشی پلاسما جرقه‌ای تیتانیوم خالص در محدوده دمایی ۱۲۰۰ تا ۱۳۵۰ درجه سانتی‌گراد، میزان چگالی نسبی را در بازه ۹۹/۸ تا ۹۹ درصد به دست آوردند [8]. میزان چگالی نسبی به‌دست‌آمده برای نمونه تیتانیومی در این پژوهش نیز طبق جدول ۱ در حدود ۹۹/۶۶ درصد اندازه‌گیری شده است که در مقایسه با گزارش شاهدهی اصل و همکارانش قابل قبول است.

بر اساس نتایج جدول ۱، با افزودن مقدار ۵ درصد وزنی کاربرد زیرکونیوم، میزان دانسیته نسبی نمونه نسبت به تیتانیوم خالص، کمی کاهش یافته است. در ادامه نیز با افزایش مقدار کاربرد زیرکونیوم به ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی، از میزان دانسیته نسبی نمونه کاسته شده است. دانسیته نسبی برای نمونه‌های حاوی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی کاربرد زیرکونیوم به ترتیب حدود ۹۸/۹۷، ۹۸/۴۶، ۹۷/۱۴ و ۹۶/۴۹ درصد محاسبه شده است. می‌توان دریافت که افزایش درصد وزنی کاربرد زیرکونیوم در نمونه‌ها، تأثیر مستقیمی بر کاهش دانسیته آن‌ها داشته است. لی و همکارانش با ساخت کامپوزیت سرامیکی کاربرد تیتانیوم-کاربرد زیرکونیوم با روش تفجوشی پلاسما جرقه‌ای نیز به این نتیجه رسیدند که با افزایش درصد وزنی کاربرد زیرکونیوم، میزان دانسیته نسبی کاهش یافته است. آن‌ها عامل اصلی را پخت ناپذیری ذرات سرامیکی کاربرد زیرکونیوم در دماهای پایین‌تر از ۱۵۰۰ درجه دانسته‌اند [12]، [7]. مشاهدات ژانگ و همکارانش نیز نشان داد که افزودن پودر کاربرد زیرکونیوم به کاربرد تنگستن، موجب کاهش چگالی نسبی کاربرد تنگستن شده است [13].

که در این رابطه D_a دانسیته ظاهری، m_1 وزن خشک، m_2 وزن غوطه‌وری، m_3 وزن اشباع و ρ چگالی مایعی که غوطه‌وری در آن صورت گرفته است. برای محاسبه دانسیته نسبی نمونه‌ها از فرمول زیر استفاده شد که در آن D_r دانسیته نسبی و D_{th} دانسیته تئوری است.

$$D_r = \frac{D_a}{D_{th}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

درصد تخلخل ظاهری نیز با توجه به داده‌های آزمون دانسیته به روش ارشمیدس با استفاده از فرمول زیر محاسبه گردید:

$$P_a = 100 \times \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \quad \text{رابطه (۳)}$$

جهت انجام آزمون‌های الکتروشیمیایی از دستگاه ivium مدل ورتکس همراه با سل سه الکترودی شامل الکتروود مرجع کالومل، الکتروود کمکی پلاتین و نمونه‌ها به‌عنوان الکتروود کار استفاده شد. جهت انجام آزمون‌های الکتروشیمیایی از محلول رینگر استفاده شد. برای آزمون امپدانس الکتروشیمیایی بازه فرکانسی ۱۰۰ KHz تا ۱۰ mHz با دامنه پتانسیل ۱۰ mV انتخاب شد. در آزمون پلاریزاسیون الکتروشیمیایی نیز سطح نمونه در بازه پتانسیل ۲۵۰ mV تا ۲۰۰۰ mV نسبت به پتانسیل مدارباز با سرعت اسکن mV/s ۱ روبش شد. به‌منظور پایداری پتانسیل قبل از آغاز آزمون‌ها نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در محلول به‌صورت غوطه‌ور قرار گرفت. سطح برای تمام نمونه‌ها با توجه به سل استفاده شده ۰/۲ سانتی‌متر مربع بود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱ - محاسبه دانسیته و تخلخل

پس از تولید نمونه‌ها به روش تفجوشی پلاسما جرقه‌ای در دمای ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۴۰ MPa و زدودن گرافیت‌های چسبیده به نمونه‌ها، دانسیته ظاهری نمونه‌ها به روش ارشمیدس محاسبه شد. با توجه به این که مقدار تیتانیوم

۳-۲- بررسی خواص الکتروشیمیایی

به منظور بررسی رفتار نمونه‌های تولیدشده و اثر ذرات سرامیکی کاربرد زیرکونیوم بر تیتانیوم، آزمون‌های امپدانس و پلاریزاسیون الکتروشیمیایی بر روی هر نمونه انجام شد و نتایج آن مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

- امپدانس الکتروشیمیایی

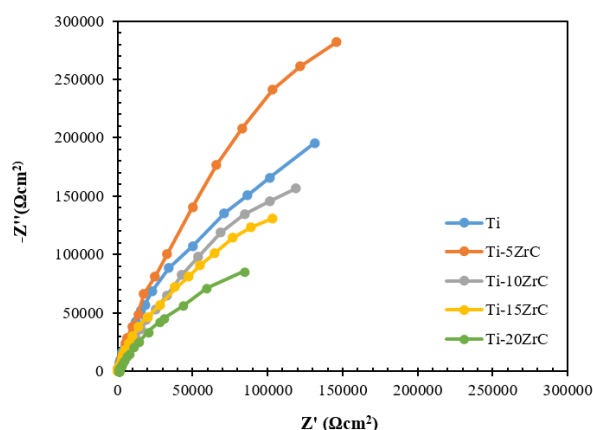
شکل ۱ منحنی‌های نایکوئیست الکتروشیمیایی حاصل از آزمون‌های امپدانس الکتروشیمیایی را نشان می‌دهد. نتایج مشابهی توسط سایر نویسندگان روی نمونه‌های تیتانیومی به دست آمده است. همان‌طور که در این شکل پیداست با افزایش ۵ درصد کاربرد زیرکونیوم قطر منحنی‌های نایکوئیست الکتروشیمیایی افزایش پیدا کرده است. از طرفی دیگر با افزایش بیشتر کاربرد زیرکونیوم قطر منحنی‌ها کاهش پیدا کرده است به نحوی که برای نمونه ۱۰ درصد نزدیک به

نمونه تیتانیوم خالص بوده و برای مقادیر بیشتر کمتر شده است.

هرچقدر قطر منحنی‌های نایکوئیست الکتروشیمیایی بزرگتر باشد، فیلم پسیو و محافظ ضخیم‌تر و نفوذ ناپذیرتر است. شکل ۱ نشان می‌دهد که با افزودن ۵ درصد وزنی کاربرد زیرکونیوم به تیتانیوم، قطر نیم دایره برای این نمونه افزایش یافته است. در نتیجه فیلم پسیو قوی‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها روی این نمونه تشکیل شده است و مقاومت به خوردگی در این نمونه بیشتر از دیگر نمونه‌ها است. به منظور تحلیل دقیق‌تر نتایج آزمون امپدانس الکتروشیمیایی با مدار معادلی که توسط سایر محققین گزارش شده بود شبیه‌سازی شدند [15], [14], [10]. این مدار معادل در شکل ۲ ارائه شده است.

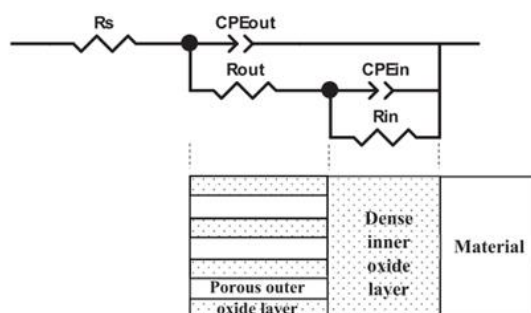
جدول ۱ - دانسیته تئوری، ظاهری و نسبی برای همه‌ی نمونه‌ها.

نمونه	دانسیته تئوری (g/cm^3)	دانسیته ظاهری (g/cm^3)	دانسیته نسبی (%)
Ti	۴/۵۰۶۰	۴/۴۹۰۹	۹۹/۶۶۴۲
Ti-5ZrC	۴/۶۱۷۲	۴/۵۶۹۹	۹۸/۹۷۶۶
Ti-10ZrC	۴/۷۲۸۴	۴/۶۵۵۸	۹۸/۴۶۵۵
Ti-15ZrC	۴/۸۳۹۶	۴/۷۰۱۳	۹۷/۱۴۲۶
Ti-20ZrC	۴/۹۵۰۸	۴/۷۷۷۱	۹۶/۴۹۱۹



شکل ۱ - منحنی‌های نایکوئیست الکتروشیمیایی، برای نمونه‌های تیتانیوم خالص و کامپوزیت‌های Ti-xZrC در محلول رینگر.

شکل ۲ - مدار معادل استفاده‌شده جهت شبیه‌سازی نتایج آزمون امپدانس الکتروشیمیایی.

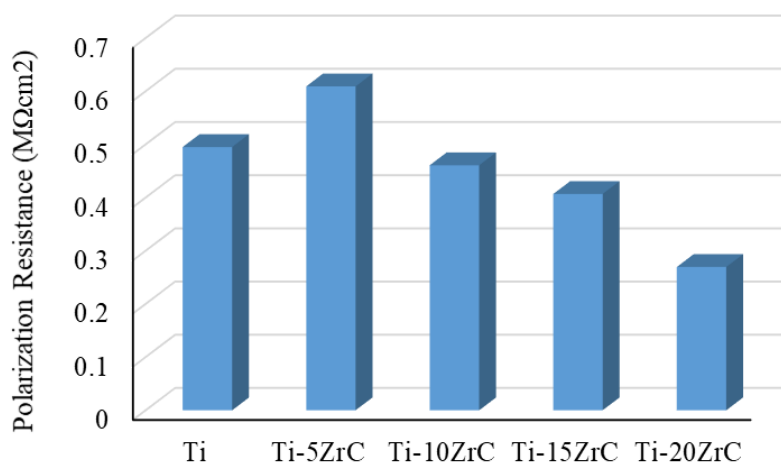


مقاومت به خوردگی نمونه‌ها است. مقاومت بالاتر لایه اکسیدی داخلی برای نمونه تیتانیوم پیش‌ازین نیز گزارش شده است [9], [16], [17]. این مقاومت در فرکانس‌های پایین بیانگر تشکیل فیلم اکسیدی قوی روی سطح است. شکل ۳ نمودار تغییرات مقاومت پلاریزاسیون ($R_{out} + R_{in}$) برای نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل پیداست در بین نمونه‌های تست‌شده، کامپوزیت حاوی ۵ درصد وزنی کاربید زیرکونیوم، بیشترین مقاومت پلاریزاسیونی نسبت به سایر نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

در این مدار R_s بیانگر مقاومت محلول، R_{in} مقاومت لایه داخلی فشرده و متراکم و R_{out} نشان‌دهنده مقاومت لایه متخلخل خارجی است. CPE بیانگر عنصر فاز ثابت است که به علت ایده آل نبودن رفتار سیستم جایگزین C_{dl} یا همان خازن لایه دوگانه شده است. در این مورد نیز اندیس in و out مربوط به لایه داخلی و خارجی است. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان داده‌شده در جدول ۲ بیانگر اینست که مقاومت لایه فشرده داخلی به مراتب بیشتر از مقاومت لایه متخلخل خارجی است که نشان‌دهنده اثر بیشتر لایه داخلی روی

جدول ۲ - نتایج حاصل از آزمون امپدانس الکتروشیمیایی برای همه نمونه‌ها.

نمونه	R_s (Ωcm^2)	R_{out} ($\text{K}\Omega\text{cm}^2$)	CPE_{out} ($\mu\text{Ss}^n\text{cm}^{-2}$)	n	R_{in} ($\text{M}\Omega\text{cm}^2$)	CPE_{in} ($\mu\text{Ss}^n\text{cm}^{-2}$)	n
Ti	۲۳۳	۶۵/۰	۱۸/۴	۰/۸۵	۰/۴۳	۴۴/۹	۰/۸۴
Ti-5ZrC	۲۲۶	۷۹/۱	۱۴/۷	۰/۸۴	۰/۵۳	۳۶/۳	۰/۸۹
Ti-10ZrC	۲۳۷	۶۰/۷	۲۰/۴	۰/۸۴	۰/۴۰	۴۹/۴	۰/۸۷
Ti-15ZrC	۲۱۵	۵۶/۸	۲۳/۴	۰/۸۳	۰/۳۵	۵۴/۶	۰/۸۹
Ti-20ZrC	۲۳۸	۲۹/۵	۴۰/۱	۰/۸۰	۰/۲۴	۷۸/۳	۰/۹۰

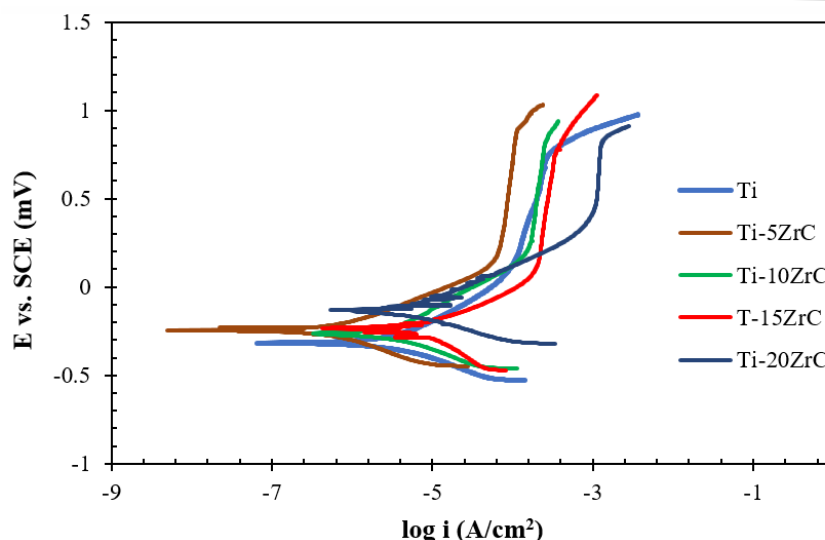


شکل ۳ - نمودار تغییرات مقاومت پلاریزاسیونی برای نمونه‌های مختلف.

- آزمون پلاریزاسیون الکتروشیمیایی

به منظور بررسی رفتار الکتروشیمیایی نمونه‌های تولیدشده آزمون پلاریزاسیون الکتروشیمیایی، بعد از آزمون امپدانس الکتروشیمیایی و یک ساعت غوطه‌وری نمونه‌ها در محلول رینگر انجام شد. منحنی‌های پلاریزاسیون مربوط به نمونه تیتانیوم خالص و کامپوزیت‌های $Ti-xZrC$ در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل پیداست در شاخه آندی در ابتدا افزایش دانسیته جریان با افزایش ولتاژ اعمال شده و سپس یک دانسیته جریان تقریباً ثابت مشاهده شد که بیانگر رفتار پسیواسیون نمونه‌های مختلف است. بر اساس این شکل با افزایش کاربید زیرکونیوم تا ۵ درصد وزنی به تیتانیوم، منحنی پلاریزاسیون الکتروشیمیایی به سمت چپ انتقال پیدا کرده است، از طرفی دیگر با افزایش بیشتر

این ماده، منحنی‌ها به سمت راست و دانسیته جریان خوردگی بالاتر انتقال پیدا کرده‌اند. جهت بررسی دقیق‌تر، این منحنی‌ها با نرم‌افزار ایویوم مورد آنالیز قرار گرفتند. نتایج حاصل از این آنالیز در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که از جدول ۴ پیداست نمونه حاوی ۵ درصد کاربید زیرکونیوم کمترین مقدار دانسیته جریان خوردگی را دارد. از طرفی دیگر با افزایش بیشتر مقدار کاربید زیرکونیوم، دانسیته جریان خوردگی افزایش پیدا کرده است. این موضوع بیانگر اثر مثبت حضور پنج درصد کاربید زیرکونیوم روی مقاومت به خوردگی بالای نمونه تیتانیوم تولیدشده به روش تفجوشی پلاسما جرقه‌ای است که تأیید کننده نتایج حاصل از آزمون امپدانس الکتروشیمیایی نیز است.



شکل ۴ - منحنی‌های پلاریزاسیون نمونه‌های مختلف در محلول رینگر.

جدول ۴ - نتایج حاصل از آنالیز منحنی‌های پلاریزاسیون الکتروشیمیایی برای همه نمونه‌ها.

نمونه	i_{corr}	E_{corr} (mV)	E_{bd} (mV)
Ti	۵/۷۷	-۳۱۵	۷۳۰
Ti-5ZrC	۴/۶۰	-۲۴۵	۸۷۳
Ti-10ZrC	۶/۲	-۲۶۹	۷۸۱
Ti-15ZrC	۷/۱	-۲۳۶	۷۳۶
Ti-20ZrC	۱۱/۶	-۱۲۹	۷۰۴

نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی اثر افزودن اکسید زیرکونیوم روی خواص الکتروشیمیایی نمونه تولید شده به روش تف جوش پلاسمای جرقه ای پرداخته شد. نتایج حاصل از سنجش دانسیته نشان داد که افزایش درصد وزنی کاربید زیرکونیوم، موجب کاهش دانسیته نمونه‌ها نسبت به نمونه تیتانیوم خالص شده است. اما با توجه به پخت ناپذیری کاربید زیرکونیوم در دمای پایین (۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد)، میزان دانسیته برای نمونه‌های حاوی درصد وزنی کمتر کاربید زیرکونیوم تا حدی قابل قبول است. نتایج حاصل از آزمون‌های الکتروشیمیایی نشان داد که برای نمونه حاوی ۵ درصد وزنی کاربید زیرکونیوم قطر منحنی‌های نایکوئیست الکتروشیمیایی افزایش پیدا کرده است و همچنین میزان جریان خوردگی نیز در این نمونه کاهش یافته است که بیانگر عملکرد بهبودیافته این کامپوزیت نسبت به تیتانیوم خالص است.

مراجع

- [1] G. S. Hanumanth and G. A. Irons, "Particle incorporation by melt stirring for the production of metal-matrix composites," J. Mater. Sci., vol. 28, no. 9, pp. 2459–2465, 1993, doi: 10.1007/BF01151680.
- [2] Y. Sahin and S. Murphy, "The effect of fibre orientation of the dry sliding wear of borsic-reinforced 2014 aluminium alloy," J. Mater. Sci., vol. 31, no. 20, pp. 5399–5407, 1996, doi: 10.1007/BF01159309.

- [3] K. Purazrang, K. U. Kainer, and B. L. Mordike, "Fracture toughness behaviour of a magnesium alloy metal-matrix composite produced by the infiltration technique," *Composites*, vol. 22, no. 6. pp. 456–462, 1991, doi: 10.1016/0010-4361(91)90205-U.
- [4] Y. H. Seo and C. G. Kang, "The effect of applied pressure on particle-dispersion characteristics and mechanical properties in melt-stirring squeeze-cast SiCp/Al composites," *Journal of Materials Processing Tech.*, vol. 55, no. 3–4. pp. 370–379, 1995, doi: 10.1016/0924-0136(95)02033-0.
- [5] M. Z. H. Bin Makmud, A. Sayuti, Y. Z. Arief, and M. U. Wahit, "Insulating performance of LLDPE/natural rubber blends by studying partial discharge characteristics and tensile properties," *Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics, ICEEI 2011*. 2011, doi: 10.1109/ICEEI.2011.6021551.
- [6] J. Robertson, S. Godfrey, and M. Ward-Close, "Titanium metal matrix composites," 2001, p. 60.
- [7] Y. Li, H. Katsui, and T. Goto, "Spark plasma sintering of TiC–ZrC composites," *Ceram. Int.*, vol. 41, no. 5, pp. 7103–7108, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.ceramint.2015.02.019.
- [8] M. Shahedi Asl, A. Sabahi Namini, A. Motallebzadeh, and M. Azadbeh, "Effects of sintering temperature on microstructure and mechanical properties of spark plasma sintered titanium," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 203, pp. 266–273, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.matchemphys.2017.09.069.
- [9] M. Bahraminasab, M. Bozorg, S. Ghaffari, and F. Kavakebian, "Corrosion of Al₂O₃-Ti composites under inflammatory condition in simulated physiological solution," *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 102, no. March, pp. 200–211, 2019, doi: 10.1016/j.msec.2019.04.047.
- [10] M. Bahraminasab, M. Bozorg, S. Ghaffari, and F. Kavakebian, *Electrochemical corrosion of Ti-Al₂O₃ biocomposites in Ringer's solution*, vol. 777. Elsevier B.V., 2019.
- [11] J. O. Abe, A. P. I. Popoola, and O. M. Popoola, "Consolidation of Ti6Al4V alloy and refractory nitride nanoparticles by spark plasma sintering method: Microstructure, mechanical, corrosion and oxidation characteristics," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 774, p. 138920, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.msea.2020.138920.
- [12] F. Bentiss et al., "Corrosion control of mild steel using 3,5-bis(4-methoxyphenyl)-4-amino-1,2,4-triazole in normal hydrochloric acid medium," *Corros. Sci.*, vol. 51, no. 8, pp. 1628–1635, 2009, doi: 10.1016/j.corsci.2009.04.009.
- [13] S. C. Zhang, G. E. Hilmas, and W. G. Fahrenholtz, "Zirconium Carbide-Tungsten Cermets Prepared by In Situ Reaction Sintering," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 90, no. 6, pp. 1930–1933, Jun. 2007, doi: 10.1111/j.1551-2916.2007.01642.x.
- [14] M. Najafizadeh, M. Bozorg, A. Bahadoran, J. Liang, and D. Zhang, "Compressive and biocorrosion properties of Ti-XAl-2Fe-3Cu alloys fabricated by powder metallurgy," *J. Alloys Compd.*, vol. 884, p. 161079, 2021, doi: 10.1016/j.jallcom.2021.161079.
- [15] J. PAN, D. THIERRY, and C. LEYGRA, "Electrochemical impedance spectroscopy study of the passive oxide film on titanium for implant application," *Electrochim. Acta*, vol. 41, no. 7–8, pp. 1143–1153, 1996, doi: 10.1016/0013-4686(95)00465-3.
- [16] S. L. De Assis, S. Wolynec, and I. Costa, "Corrosion characterization of titanium alloys by electrochemical techniques," *Electrochim. Acta*, vol. 51, no. 8–9, pp. 1815–1819, 2006, doi: 10.1016/j.electacta.2005.02.121.

- [17] B. Sivakumar, L. C. Pathak, and R. Singh, "Role of surface roughness on corrosion and fretting corrosion behaviour of commercially pure titanium in Ringer's solution for bio-implant application," *Appl. Surf. Sci.*, 2017, doi: 10.1016/j.apsusc.2017.01.033.

